

Л. Ф. Черногор

**Физические эффекты пролета Челябинского метеорита***(Представлено академиком НАН Украины А. А. Коноваленко)*

*Оценены основные эффекты, сопровождавшие падение Челябинского болида (Чебаркульского метеорита) 15 февраля 2013 г. Показано, что основное энерговыделение (около 0,2 Мт) имело место вблизи высоты 25 км, где скорость потерь массы достигала 20 кг/с, энергия оптического свечения — 375 ТДж. Вблизи эпицентра взрыва болида давление во фронте ударной волны составляло единицы килопаскалей. Площадь зоны частичных разрушений построек была близка к 6 тыс. км<sup>2</sup>. Взрыв болида привел к заметному возмущению не только нижней, но и верхней атмосферы на удалениях не менее 1–2 тыс. км. Величина геомагнитного эффекта составила 0,5–1,0 нТл. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом болида, не превышала 3.*

Пролет Челябинского метеорита над населенными пунктами, сопровождавшийся яркой вспышкой и грохотом, представлял собой самый опасный удар космического тела за последнее столетие. Он нашел резонансный отклик у большого количества людей. Частично пострадали постройки. В Челябинске взрывом было выбито около 20 тыс. м<sup>2</sup> оконных стекол. В Челябинской области пострадало от мелких ранений более 1,6 тыс. человек. Жертв, к счастью, не было. Нанесенный ущерб превысил 30 млн долларов США. Ввиду уникальности события актуальной задачей является детальное и всестороннее изучение эффектов падения на Землю каждого достаточно крупного космического тела, а также последствий такого падения [1–3].

Болид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03 : 20 : 26 UT. Космическое тело двигалось с востока на запад (азимут составлял  $\approx 270^\circ$ ) под углом к горизонту  $\approx 20^\circ$ . Начальная масса тела  $m_0 \approx 11$  кг, начальная скорость  $v_0 \approx 18,5$  км/с, а начальный диаметр тела —  $d_0 \approx 18$  м [4]. Найденные осколки болида свидетельствуют о том, что космическое тело представляло собой хондрит типа LL5, в составе которого были металлическое железо, оливин и сульфиты.

Взаимодействию болидов с атмосферой посвящен ряд работ (см., например, [6, 7]), где изучены особенности движения и разрушения болидов в атмосфере, детально разработана теория дробления метеоритов.

Цель настоящей работы — оценка основных физических эффектов, сопутствовавших падению Челябинского болида.

**Физические процессы, сопровождавшие падение метеорита.** Падение достаточно крупных метеоритов сопровождается целым комплексом первичных и вторичных физических процессов (см., например, [5]).

Кинетическая энергия метеороида в процессе его полета расходуется на образование головной отсоединенной ударной волны. За фронтом ударной волны происходит нагрев воздуха в ударно-сжатом слое, возбуждение колебаний молекул, их диссоциация и ионизация, т. е. образование плазмы. Определенная часть кинетической энергии частиц воздуха за фронтом ударной волны передается телу за счет конвективного переноса. Электроны

плазмы передают метеороиду часть энергии за счет теплопроводности. Нагретый воздух излучает электромагнитные волны. Энергия излучения обеспечивает нагрев и испарение вещества болида, прогрев, расширение и разлет паров вещества тела, нагрев и ионизацию воздуха перед фронтом ударной волны. Разлет паров представляет собой абляционную ударную волну. Не поглощенная часть излучения высвечивается преимущественно в оптическом диапазоне.

Образовавшаяся при движении метеороида баллистическая волна расширяется в стороны от траектории тела, постепенно затухая. Баллистическая и абляционная волны, сложившись, образуют ударную волну. Достигая поверхности Земли, ударная волна от метеороида производит механические повреждения и разрушения. Световая вспышка вызывает нагрев, ожоги и даже — при достаточной энергии — пожары.

Первичные процессы приводят к возникновению вторичных процессов во всех геоблоках, часть которых кратко описана ниже.

Остатки метеороида, двигаясь с дозвуковой скоростью, выпадают на поверхность Земли.

Движение достаточно крупных ( $d \geq 10 \div 20$  м) космических тел приводит к образованию нагретого следа. После выделения энергии на заключительной стадии торможения продукты взрыва всплывают вдоль следа. Образуется так называемый плюм (см., например, [2]).

Тепловые и ударно-волновые процессы при движении метеороида, а также плюма сопровождаются магнитными и электрическими возмущениями.

**Результаты расчетов.** Движение метеороида в атмосфере Земли описывается известными уравнениями торможения, потери массы, изменения угла падения, высоты и свечения тела (см., например, [5, 7]):

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{C_d}{2} \rho v^2 S + mg \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_h}{2Q} \rho v^3 S, \quad (2)$$

$$mv \frac{d\alpha}{dt} = mg \cos \alpha - \frac{mv^2}{R_E} \cos \alpha - \frac{C_L}{2} \rho v^2 S, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \alpha, \quad (4)$$

$$I = -\frac{\tau}{2} \frac{d}{dt} mv^2, \quad (5)$$

где  $m$  и  $v$  — масса и скорость тела;  $S$  — площадь сечения (мидель) болида;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\alpha$  — угол между касательной к траектории и горизонтом;  $C_d$  и  $C_L$  — коэффициенты динамического сопротивления и подъемной силы;  $C_h$  — коэффициент теплообмена,  $Q$  — удельная теплота сублимации;  $R_E$  — радиус Земли;  $\rho$  — плотность атмосферы на высоте  $z$ ;  $\tau$  — коэффициент светимости.

Данные уравнения решались численно с учетом дробления космического тела. Считалось, что начальная форма тела близка к шарообразной. Полагалось, что коэффициенты динамического сопротивления  $C_d$ , теплообмена  $C_h$  и светимости  $\tau$  в процессе движения тела оставались неизменными ( $C_d = 1$ ,  $C_h = 0,02$  и  $\tau = 0,2$ ). Удельная теплота сублимации полагалась равной 1,5 МДж/кг. Принималась экспоненциальная модель атмосферы с масштабом  $H = 7,5$  км.

Начальная кинетическая энергия космического тела оказалась близка к  $1,88 \cdot 10^{15}$  Дж. Такая энергия выделяется при взрыве 0,44 Мт тринитротолуола. Энергия взрыва Челябинского болида эквивалентна взрыву 35 бомб, сброшенных в 1945 г. на Хиросиму.

Основное выделение энергии падающего болида происходило в слое атмосферы толщиной около 22 км. Характерное время энерговыделения составило 1,2 с. При этом характерная мощность процесса равнялась 1,6 ПВт.

Рассмотрим кратко основные эффекты, сопровождавшие падение Челябинского болида.

В верхней части траектории каменный болид испытывал шелушение, на высотах 20–35 км — дробление. Первоначально шароподобное тело болида постепенно превращалось в блинообразное тело с монотонно увеличивающимся сечением (миделем).

Космическое тело разрушается при условии, что динамическое давление на него сравнивается с прочностью вещества тела. Разные части болида имеют разную прочность, поэтому прочность каменного метеорита (хондрита) изменяется в широких пределах:  $\sigma = 10^6 \div 10^7$  Н/м<sup>2</sup> [2]. Условие разрушения выполняется на высотах, где  $\rho \approx 5,8 \cdot 10^{-3} \div 5,8 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>. Им соответствуют диапазон высот 37–22 км. Принималось, что дробление болида началось на высоте  $z_0 \approx 37$  км, а закончилось на высоте  $\approx 20$  км. После начала дробления осколки двигались как квазижидкость, приобретая поперечную скоростью порядка 1–10 м/с.

Результаты расчета миделя  $S$ , скорости болида  $v$  и скорости потери его массы  $dm/dt$  приведены в табл. 1, из которой видно, что основная потеря массы болида имела место на высотах 23–27 км.

Рассмотрим оптическое излучение болида. Интегральная энергия излучения  $E_r$ , определенная при помощи сенсоров, установленных на геостационарных ИСЗ США, оказалась близкой к  $3,75 \cdot 10^{14}$  Дж [4]. При эффективной длительности импульса излучения, равного 1,2 с, имеем пиковую мощность излучения 313 ТВт.

Оценим далее плотность потока энергии оптического излучения. Считая, что излучение истекает от огненного шара, площадь поверхности которого близка к  $8 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>, получим, что плотность потока равна  $3,9 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>. Плотность потока мощности вблизи эпицентра с учетом поглощения в атмосфере близка к  $9 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Она более чем на порядок превышала плотность потока света от Солнца (около 500 Вт/м<sup>2</sup>). Если бы область взрыва имела свойства абсолютного черного тела, то его температура при указанных значениях плотности потока равнялась бы  $1,5 \cdot 10^4$  К. При этом максимум излучения приходился на длину волны около  $1,9 \cdot 10^{-7}$  м. В действительности, излучение нагретого тела скорее объемное, чем поверхностное. В любом случае его температура была несколько меньше  $10^4$  К.

Зная величину  $E_r$ , можно оценить потенциальную пожароопасность болида. Оказалось, что вблизи эпицентра плотность потока энергии от вспышки болида близка к  $1,8 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Возгорание сухого вещества возникает при плотности потока  $(2 \div 10) \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>. Так что пожары при взрыве Челябинского болида жителям не грозили.

Оценим параметры ударной волны. Будем считать, что основное взрывоподобное энерговыделение имело место вблизи высоты 25 км (см. табл. 1). Считая взрыв цилиндрическим, вычисление радиуса ударной волны дало значение, равное 0,43 км. Для ударной волны цилиндрического типа в экспоненциальной атмосфере избыточное давление под эпицентром взрыва близко к 2,4 кПа. Зависимость избыточного давления  $\Delta p(R)$  приведена в табл. 2 ( $R_0$  — расстояние от эпицентра вдоль поверхности Земли). Видно, что вплоть до расстояний в 100 км ударная волна остается достаточно сильной, чтобы вызывать частичные разрушения. Оценки  $\Delta p_s(R)$  для сферической на достаточно больших расстояниях волны также

Таблица 1. Высотная зависимость плотности атмосферы, основных кинематических и энергетических параметров болида ( $E_k$  и  $P$  — кинетическая энергия и мощность торможения болида)

$z$ , км	18	19	20	21	22	23	24	25	27	30	32	35	37
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$10^{-1}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
$S$ , м <sup>2</sup>	$7,5 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$	$4,36 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	922	254
$v$ , км/с	0,07	0,45	1,7	4,6	8,3	11,6	14,3	15,9	17,6	18,4	18,5	18,5	18,5
$m$ , кг	3,50	3,50	3,54	3,76	4,41	5,50	6,94	8,16	9,87	10,9	11,0	11,0	11,0
$-\frac{dm}{dt}$ , кг/с	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,1	1,84	7,82	15,3	19,2	18,2	10,9	3,85	1,7	0,3	0,06
$E_k$ , ТДж	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,35	5,1	40	152	370	710	1030	1530	1845	1880	1880	1880
$P$ , ПВт	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$9,49 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$8,57 \cdot 10^{-1}$	2,18	3,29	3,68	2,53	$9,38 \cdot 10^{-1}$	$4,19 \cdot 10^{-1}$	$7,59 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$

приведены в табл. 2. При избыточном давлении в 1 кПа площадь частичных повреждений близка к 6 тыс. км.

Распространение ударной волны вверх привело к возмущению верхней атмосферы. Результаты расчета высотной зависимости  $\Delta p(z)$  приведены в табл. 3, из которой видно, что по мере увеличения высоты избыточное давление во фронте ударной волны достаточно быстро уменьшается. Относительное избыточное давление на высотах более 50 км увеличивается. Реально величина избыточного давления будет несколько меньше, так как при расчетах не учитывалась диссипация энергии волны.

Энергия ударной волны распространяется также в горизонтальном направлении. Так, при сферической расходимости на высоте 300 км и расстоянии 1000 км относительное избыточное давление порядка 1. Энергия волны, однако, может каналироваться в природных атмосферных волноводах. При этом на расстоянии в 1000 км от гипоцентра взрыва указанный параметр может быть заметно больше.

Рассмотрим акустический эффект пролета и взрыва болида. Движение болида в атмосфере приводит к генерации волн плотности в широком диапазоне частот: от акустических частот  $\sim 1$  кГц до частот порядка  $10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-3}$  Гц, соответствующих внутренним гравитационным волнам. До взрыва болида в энергию акустических и внутренних гравитационных волн преобразуется около 1 и 5% кинетической энергии болида (см., например, [3, 9]), т. е. около  $1,9 \cdot 10^{13}$  и  $9,4 \cdot 10^{13}$  Дж соответственно. При взрыве болида в энергию ударной волны переходит около 30% кинетической энергии болида [2], т. е. около  $5,6 \cdot 10^{14}$  Дж. На достаточно больших удалениях от места взрыва энергия ударной волны преобразуется в энергию акустико-гравитационных волн.

Период акустических волн с наибольшей амплитудой связан с энергией источника [3]. Оказалось, что он близок к 21 с. Эта оценка справедлива для приземных взрывов. При взрыве на высоте в 25 км период волн приблизительно равен 63 с. Примерно такие периоды (около 55 с) действительно наблюдались на инфразвуковой станции в Казахстане [10]. Дальше других (вплоть до глобальных) расстояний распространяются волны с максимальным периодом около 4,5 мин [3]. В их энергию переходит  $\approx 10\%$  энергии взрыва.

Кратко опишем ионосферные эффекты. Ударная волна приводит к движущемуся фронту повышенной концентрации электронов. Относительное возмущение последней примерно

Таблица 2. Зависимость давления в ударной волне от расстояния ( $S_d = \pi R_0^2$  — площадь повреждений и разрушений)

$R$ , км	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$R_0$ , км	0	16,6	31,2	43,3	54,5	65,4	76	86,5	96,8
$\Delta p$ , кПа	2,4	2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,26	1,2
$\Delta p_s$ , кПа	2,4	1,8	1,3	1	0,9	0,75	0,66	0,59	0,53
$S_d$ , км <sup>2</sup>	0	855	$3,1 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^3$	$9,3 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$

Таблица 3. Высотная зависимость давления в ударной волне, значение приведенной высоты  $H$  и давления в невозмущенной атмосфере

$z$ , км	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
$2H$ , км	15	15	15	15	15	15	15	21,7	43,5	87	90
$\Delta p$ , кПа	720	220	18	6,7	2,7	1,1	0,5	0,2	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
$p_0$ , кПа	$1,8 \cdot 10^3$	480	130	33,5	8,8	2,3	0,6	0,16	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p/p_0$	0,40	0,46	0,14	0,20	0,31	0,48	0,83	1,25	7,5	16,9	34,4

равно относительному возмущению давления. Движение ударной волны является источником перемещающихся ионосферных возмущений в диапазоне акустико-гравитационных волн (см., например, [3, 1]).

Нестационарный плазменный след, взаимодействуя с геомагнитным полем болида, является источником магнитогидродинамических волн, которые могут распространяться в ионосфере и магнитосфере. В результате взаимодействия этих волн с высокоэнергичными электронами радиационного пояса Земли могут возникнуть высыпания электронов в атмосферу [3, 12].

Геомагнитный эффект болидов изучен недостаточно. Механизмы генерации геомагнитных возмущений, перечисленные в работе [13], не могут считаться эффективными. Наиболее существенным механизмом является модуляция токовой струи в динамообласти ионосферы, которая находится в основном на высотах 100–150 км [3]. Модуляция происходит за счет движения газа в поле акустико-гравитационной волны от взрыва (см., например, [11]). Оценки показывают, что для периода акустической волны, равного 60 с, относительного изменения концентрации электронов, равной 1, плотности ионосферного тока, равного  $10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, амплитуда геомагнитных пульсаций близка к 0,5–1,0 нТл.

Оценим далее величину сейсмического эффекта. При площади воздействия ударной волны в 1000 км<sup>2</sup> имеем значение энергии ударной волны у поверхности Земли, равное  $10^{13}$  Дж. В энергию сейсмических волн переходит около  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  энергии ударной волны от приземного взрыва [3]. При этом энергия сейсмических волн составляет  $10^8$ – $10^9$  Дж. Такому значению энергии соответствует магнитуда землетрясения, близкая к 2,1–2,8. Землетрясение с такой магнитудой практически не ощущаются человеком. Добавим, что сейсмические измерения дали магнитуду, равную 3,2 [14, 15].

Таким образом, Челябинский болид вызвал комплекс явлений в атмосфере и магнитосфере, т. е. в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) в целом [12]. Их детальное описание требует, однако, отдельного рассмотрения.

В заключение оценим частоту падения метеороидов, подобных Челябинскому. Частота падения космических тел зависит от его энергии (массы и скорости). При этом число падающих тел в течение 1 года дается известным эмпирическим соотношением (см., например, [3, 8]). Расчеты по этому соотношению позволяют утверждать, что тела, подобные Челябинскому метеороиду, падают на Землю примерно каждые 65 лет.

**Обсуждение результатов.** Пролет и взрыв Челябинского болида вызвал целый комплекс физических процессов на поверхности планеты, в атмосфере и геокосмосе. Оцененная высота основного энерговыделения примерно равнялась 25 км. Ее значение зависит от точности задания входных параметров. Варьирование этих параметров приводит к изменению высоты взрыва не более чем на несколько километров.

Размер (около 18 м) и начальная энергия (около 0,44 Мт) космического тела была достаточно велика, чтобы тело отнести скорее к малым астероидам, чем к большим болидам (суперболидам). Можно условно принять, что диаметр малого астероида составляет 10–100 м, а болидов — 0,1–10 м.

Эффекты Челябинского болида (малого астероида) существенно отличались от эффектов, вызванных взрывом Тунгусского тела. Основных причин две. Первая из них — начальная энергия (масса) Тунгусского тела была на два порядка больше, чем Челябинского. Вторая причина заключается в том, что высота взрыва Тунгусского тела была близка к 6–8 км. Поэтому зона разрушений и пожаров при падении Тунгусского тела составляла около 2000 и 500 км<sup>2</sup> соответственно (см., например, [2, 3]).

Достаточно большая высота взрыва (около 25 км) Челябинского метеороида (малого астероида) привела лишь к незначительным разрушениям элементов жилых построек. Этим же объясняется и относительная легкость ранений жителей пострадавшего региона.

Магнитный эффект Тунгусского тела составил около 50–70 нТл [2], что объясняется движением плюма. При этом, по расчетам, возмущение магнитного поля близко к 60 нТл. Для Челябинского метеороида магнитный эффект на два порядка меньше.

Важно, что возмущения, вызванные взрывом Челябинского тела, распространялись как по вертикали на сотни километров вверх, так и по горизонтали на расстояния в тысячи километров. Регистрируемые возмущения возникли не только в атмосфере, но и в ионосфере, а также геомагнитном поле. Результаты наблюдений эффектов в этих средах еще предстоит осмыслить. Уже сейчас можно утверждать, что сама природа предоставила редкую возможность изучения целого комплекса явлений на поверхности Земли, в атмосфере и геокосмосе астрономам, физикам, геофизикам, сейсмологам и другим специалистам.

1. *Gehrels T.* (Ed.) Hazards due to comets and asteroids. – Tucson; London: Univ. Arizona Press, 1994. – 1300 p.
2. *Катастрофические* воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. – Москва: ИКЦ “Академкнига”, 2005. – 310 с.
3. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф. – Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. – 556 с.
4. <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/asteroidflyby.html>,  
<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs>,  
[http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball\\_130301.html](http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html).
5. *Бронштэн В. А.* Физика метеорных явлений. – Москва: Наука, 1981. – 416 с.
6. *Григорян С. С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. – 1979. – **17**, № 6. – С. 875–893.
7. *Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И.* Аэродинамика болидов. – Москва: Наука, 1995. – 240 с.
8. *Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., Tagliaferri E.* The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. – 2002. – **420**. – P. 294–296.
9. *Голыцын Г. С., Григорьев Г. Н., Докучаев В. П.* Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика Земли и океана. – 1977. – **13**, № 9. – С. 926–9235.
10. <http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors>.
11. *Черногор Л. Ф.* Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – **51**, № 1. – С. 119–132.
12. *Черногор Л. Ф.* О нелинейности в природе и науке. – Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
13. *Бронштэн В. А.* Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – **42**, № 6. – С. 854–856.
14. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lral#summary>.
15. [http://pts.mi-perm.ru/region/korkino\\_meteor.htm](http://pts.mi-perm.ru/region/korkino_meteor.htm).

Л. Ф. Черногор

### Фізичні ефекти прольоту Челябінського метеорита

*Оцінено основні ефекти, що супроводжували падіння Челябінського боїда (Чебаркульського метеорита) 15 лютого 2013 р. Показано, що основне енерговиділення (близько 0,2 Мт) мало місце близько висоти 25 км, де швидкість втрати маси досягала 20 кт/с, енергія оптичного свічення — 375 ТДж. Близько епіцентру вибуху боїда тиск у фронті ударної хвилі становив одиниці кілопаскалей. Площа зони часткових руйнувань будівель була близька до 6 тис. км<sup>2</sup>. Вибух боїда призвів до помітного збурення не лише нижньої, а й верхньої атмосфери на віддаленнях не менше 1–2 тис. км. Розмір геомагнітного ефекту становив 0,5–1,0 нТл. Магнітуда землетрусу, викликаного вибухом боїда, не перевищувала 3.*

L. F. Chernogor

### Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage

*The main effects associated with the (February 15, 2013) Chelyabinsk bolide (Chebarkul meteorite) have been estimated. The major energy release (approximately 0.2 Megaton) occurred near the 25-km altitude, where the rate of mass loss attained 20 kiloton s<sup>-1</sup>, and the optical emission energy was 375 TJ. The pressure at the shock wave front near the bolide explosion epicenter attained a few kPa. The surface area of partial destructions was equal to approximately 6,000 km<sup>2</sup>. The bolide explosion gave rise to appreciable disturbances not only in the lower atmosphere, but also in the upper one at a distances up to 1,000–2,000 km. The effects in the geomagnetic field reached 0.5–1.0 nT. The earthquake caused by the bolide explosion had a Richter magnitude of at most 3.*